بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر انحلال میکروبی مس از کانسنگ سولفیدی کم‌عیار مجتمع مس شهر بابک*

مقاله علمی – پژوهشی

سعید شیبانی[۱]	سامان بیک‌زاده نوعی[۲]	فرشته رشچی[۳]

چکیده

در این تحقیق، عوامل موثر بر انحلال میکروبی مس از کانسنگ سولفیدی کم‌عیار معدن مس شهربابک با طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ ارزیابی شده است. از باکتری‌های مزوفیل اسیدی تیوبا سیلوس فرواکسیدان و تیوبا سیلوس تیواکسیدان استفاده شده است. غربال‌گری پارامترها به روش دوفاکتوریل صورت گرفت. بهینه سازی انحلال مس به روش سطح پاسخ بررسی شد. تاثیر جداگانه هر یک از پارامترها مانند نسبت جامد به مایع، درصد باکتری اسیدیتیوباسیلوس تیواکسیدان و میزان آهن دو ظرفیتی علاوه بر برهم کنش آنها بر روی انحلال میکروبی مس بررسی شد. شرایط بهینه با استفاده از تحلیل آماری و تحلیل واریانس (ANOVA) مشخص شد. نسبت جامد به مایع ۷/۵۵ گرم بر میلی‌لیتر، ۸۰ درصد باکتری اسیدیتیوبا سیلوس تیواکسیدان و میزان آهن ۲۰ گرم بر لیتر به عنوان شرایط بهینه منجر به استحصال ۹۹/۴۰ درصد مس گردید. همچنین تاثیر پارامترهای انتخابی بر انحلال مس مدل سازی شد و متغیر درصد باکتری T.t بیشترین تاثیر را بر انحلال مس دارد. تحلیل آماری نشان داد که مدل به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی مس، انحلال میکروبی، کانسنگ سولفیدی، طراحی آزمایش، فاکتوریل دوسطحی، رویه پاسخ.

Optimization of Effective Parameters on Copper Bioleaching from Low-Garde Sulfide Ore from Shahrbabak Copper Complex

S. Sheibani	S. Beikzadeh Noee	F. Rashchi

Abstract

In this paper, the effective parameters on bioleaching of copper from low grade copper-sulfide ore from Shahrbabak copper complex were investigated using design of experiments. Mesophelic bacteria of A. ferrooxidans (T.f) and A. thiooxidans (T.t) were used. A two-factorial methodology was used to find the effective parameters. Response surface methodology was applied to optimize the leaching of copper. The individual effects and possible interactions of pulp density, percent of T.t bacteria and amount of Fe on the bioleaching of copper were investigated. The optimum conditions were determined using statistical analysis and analysis of variance (ANOVA). The optimum conditions for the copper recovery of 99.4% were pulp density of 7.55 g/mL, 80% of T.t bacteria and 20 g/L of Fe. Also, the most effective factor for the copper recovery was the percent of T.t bacteria. Furthermore, the statistical analysis indicates that the model fits the experimental data well.

Key Words Copper, Bioleaching, Sulfide Ore, Design of Experiments, Two-Level Factorial, Response Surface.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۱۲/۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۲/۳ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

Email: ssheibani@ut.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

DOI: 10.22067/ma.v31i1.70970

مقدمه

طی سال‌های اخیر به بازیابی فلزات از معادن کم عیار، پس‌ماند فرآیندهای تولید، کاتالیست‌های مستعمل، سرباره‌ها، غبارها و گازهای حاصل از فرآیندهای تولید، توجه زیادی شده است. با توجه به عیار نسبتا کم فلزات در این منابع ثانویه، اغلب از روش هیدرومتالورژی استفاده شده است [1]. در این میان روش انحلال با استفاده از باکتری‌ها و میکروارگانیسم‌ها مورد توجه زیادی قرار گرفته است. برای استفاده از این روش دلایلی همچون ارزانی و صرفه‌ی اقتصادی، سادگی تجهیزات عملیاتی، جلوگیری از ایجاد پسماندها، زباله‌ها و اسیدهای خطرناک و نیز قابلیت بازیابی غلظت‌های بسیار کم را می‌توان ذکر نمود [2].

فرآیندهای انحلال میکروبی به ویژه برای فرآوری سولفیدهای مس ثانویه بسیار مناسب هستند. به خصوص روش انحلال میکروبی توده‌ای (Heap bioleaching) به صورت صنعتی برای استخراج مس مورد استفاده قرار گرفته است. موثر بودن انحلال میکروبی تا حد زیادی به کارآیی میکروارگانیسم‌ها و ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی کانسنگ بستگی دارد. بیشترین کارایی زمانی حاصل می‌شود که شرایط انحلال با شرایط بهینه رشد باکتری مطابقت داشته باشد [۵-3]. بیشتر سولفیدهای ثانویه مس مانند کالکوسیت (Cu_2S)، دیگنیت (Cu_9S_5)، کوولایت (CuS) و بورنیت (Cu_5FeS_4) می‌توانند در حضور باکتری‌های مزوفیل حل شوند. باکتری‌های اسیدیتیوباسیلوس فرواکسیدانس (T.f)، اسیدیتیوباسیلوس تیواکسیدانس (T.t) و لپتوسپریلیوم فرواکسیدانس پرکاربردترین میکروارگانیسم‌ها در این حوزه هستند [6]. کلیه این باکتری‌ها در محیط اسیدی فعال بوده و دامنه مناسب pH برای آن‌ها ۱/۵ تا ۳/۵ است. درجه حرارت بهینه نیز برای آن‌ها ۲۵ الی ۴۰ درجه سیلسیوس است. باکتری T.f، سولفید آهن را ابتدا به گوگرد عنصری و آهن دو ظرفیتی تجزیه کرده و سپس گوگرد را به اسید سولفوریک و آهن دو ظرفیتی را به آهن سه ظرفیتی اکسید می‌نماید. تبدیل سولفید آهن به گوگرد و آهن دو ظرفیتی توسط این باکتری‌ها به سرعت انجام می‌شود، ولی اکسایش گوگرد به اسید و آهن دو ظرفیتی به آهن سه ظرفیتی کند است. باکتری T.t، عملا قابلیت تبدیل سولفید آهن را به گوگرد عنصری و آهن دو ظرفیتی ندارد. ولی گوگرد و آهن دو ظرفیتی تولید شده توسط T.f را به سرعت به اسید و آهن سه ظرفیتی تبدیل می‌نماید و در این مورد به مراتب فعال‌تر از T.fها است. واکنش‌های (۱) تا (۳) مکانیزم فعالیت این باکتری‌ها را نشان می‌دهند [7].

$$2Fe^{2+} + 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{T.t \text{ باکتری}} 2Fe^{3+} + H_2O \quad (۱)$$

$$2Fe^{3+} + MeS \rightarrow Me^{2+} + S + 2Fe^{2+} \quad (۲)$$

$$S + H_2O + \frac{3}{2}O_2 \xrightarrow{T.t \text{ باکتری}} H_2SO_4 \quad (۳)$$

انحلال میکروبی کانه‌های سولفیدی مس فرآیندی بسیار پیچیده است. فراهم بودن شرایط بهینه پارامترهای مختلف مانند دما، نسبت جامد به مایع و میزان تلقیح باکتری، pH، محیط کشت، میزان گوگرد و میزان آهن روی استخراج مس موثر هستند [9, ۸]. در پژوهشی نحوه تاثیرگذاری دانسیته پالپ و pH روی درصد استخراج مس با انحلال میکروبی توسط باکتری‌های T.f و T.t انحلال کانه سولفیدی مس بررسی شده است [10]. به طور کلی سرعت انحلال شیمیایی کالکوپیریت کم است که به طبیعت مقاوم آن نسبت به انحلال شیمیایی و بیولوژیکی مربوط است [11,12]. حضور پیریت (FeS_2) هم در کانسنگ‌های سولفوری گزارش شده است. با وجود اینکه حضور آهن در کانسنگ حاوی مس، میزان انتخاب‌گری انحلال را پایین می‌آورد، وجود پیریت در کنار کالکوسیت با تشکیل یک زوج گالوانیک موجب افزایش استحصال مس از کالکوسیت می‌شود. از طرف دیگر رشد و تکثیر باکتری در محیط کشت به ترکیب مواد معدنی در محیط بستگی دارد. لذا علت دیگر تاثیر مثبت حضور پیریت می‌تواند به حضور گوگرد و یون Fe^{2+} به شکل $FeSO_4.7H_2O$ به عنوان منبع انرژی برای رشد باکتری مربوط باشد [13]. حضور یون‌های مضر در نمونه معدنی یا ماده‌ی خام حاوی فلز مورد نظر، سبب از بین رفتن فعالیت میکرواورگانیسم‌ها در محیط کشت می‌شوند. در نتیجه درصد اضافه کردن جامد در فرآیند

انحلال میکروبی همواره با محدودیت همراه بوده است [14]. از طرف دیگر مطالعه مقایسه‌ای روی انحلال میکروبی کانه‌های سولفیدی مس توسط محیط‌های خالص و مخلوط شامل باکتری‌های مزوفیل انجام شده است [15]. همچنین در بررسی دیگری گزارش شده است که درصد استخراج مس پس ۱۱۷ روز در محیط خالص و مخلوط به ترتیب برابر ۱٤/۸۷ و ۲۰/۱۱ حاصل می‌شود [16].

از طرف دیگر استفاده از روش طراحی آزمایش به کمک نرم‌افزارهای مهندسی جهت بررسی و مدل‌سازی فرایند انحلال میکروبی، این امکان را میسر خواهد نمود که با به دست آوردن برهم‌کنش پارامترهای موثر در فرآیند، بهترین شرایط لازم جهت حصول بالاترین میزان انحلال مس فراهم شود. لازم به ذکر است که در روش‌های معمول بررسی فرآیندهای شیمیایی، با ثابت نگه داشتن پارامترها فقط یک پارامتر در آن واحد مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرد ولی در این روش، پارامترها به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته و امکان بررسی برهم‌کنش آنها میسر می‌شود.

هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر پارامترهای مهم در فرآیند انحلال میکروبی کانسنگ سولفوری کم عیار (۰/۲٤ درصد مس) معدن میدوک مجتمع مس شهر بابک بوده است. با توجه به تاثیر قابل توجه کانی‌شناسی و ترکیب کانه بر فرآیند انحلال میکروبی، در این تحقیق رفتار کانسنگ سولفوری کم عیار معدن میدوک مجتمع مس شهر بابک به طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است تنوع کانه‌ها در معادن مس باعث شده تا علی‌رغم وجود بررسی‌های قبلی روی کانه‌های مس کم عیار، مطالعه موردی در این خصوص نوآوری کار محسوب شود. علاوه بر این با وجود بررسی‌های متنوع در خصوص انحلال میکروبی کانه‌های مس سولفیدی، کارایی انحلال به میزان بالایی به کارایی میکروارگانیسم در آن محیط، ترکیب شیمیایی و مینرالوژیکی ماده وابسته است. لذا میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در این تحقیق از بانک میکروارگانسیم‌های شرکت مس شهر بابک تهیه شد تا قابلیت سازگار شدن این میکروارگانسیم‌ها با شرایط انحلال میکروبی کانسنگ سولفوری کم عیار معدن میدوک مجتمع مس شهر بابک بررسی شود.

روش انجام آزمایش

مواد و تجهیزات آزمایش

از دو نوع باکتری T.f و T.t جهت انجام آزمایش‌های انحلال میکروبی استفاده شد. این دو باکتری از خانواده باسیل‌ها هستند و از نظر pH و دمای مناسب برای فعالیت و رشد باکتری در محدوده مناسبی قرار دارند. میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در این تحقیق از بانک میکروارگانسیم‌های شرکت مس شهر بابک تهیه شد. مشخصات این آنها همراه با شماره مرکز کلکسیون میکروارگانیسم‌های صنعتی ایران (Persian Type Culture Collection (PTCC No.)) در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱ مشخصات باکتری‌های استفاده شده

شماره	نام باکتری	PTTC No	دمای محیط کشت (^{o}C)
۱	T.f	-	۳۰
۲	T.t	۱٦۹۲	۳۰
۳	T.t	۱۷۱۷	۲۸

جهت انجام آزمایش‌های انحلال میکروبی لازم است که هر میکروارگانیسم در محیط کشت اختصاصی خود رشد کرده و تولید اسید نماید. ترکیب شیمیایی محیط‌های کشت باکتری‌های T.t و T.f در جدول (۲) آورده شده است. مبنای تهیه محیط کشت باکتری‌ها بر اساس محلول‌های پیشنهاد شده بانک اطلاعاتی باکتری سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران بوده است. لازم به ذکر است در همه موارد ترکیب‌های بیان شده به یک لیتر آب یون‌زدایی شده اضافه می‌شود. در ابتدا سعی شد تا محیط کشت مناسب برای رشد و تکثیر باکتری از طریق کشت باکتری‌ها در محیط‌های مختلف انتخاب گردد. علاوه بر محیط‌های کشت اختصاصی A، B و 9k که به ترتیب برای باکتری‌های T.t۱٦۹۲، T.t۱۷۱۷ و T.f انتخاب شد، جهت بررسی حضور همزمان این

باکتری‌ها در آزمایش‌های انحلال میکروبی، محیط کشت مخلوط (Mix) نیز مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی (بر حسب گرم) محیط کشت‌های باکتری های T.t و T.f

	9k	A	B	Mix
$(NH_4)_2SO_4$	۳/۰	-	۲/۰۰	٤
KCl	۰/۱	-	۰/۱	۰/۱
K_2HPO_4	۰/۵	-	۰/۱۰	۰/۵
$MgSO_4.7H_2O$	۰/۵	-	۰/۲۵	۰/۵
$Ca(NO_3)_2$	۰/۰۱	-	–	۰/۰۱
$FeSO_4.7H_2O$	٤٤/۲۲	-	-	۲۲/۱
$CaCl_2.2H_2O$	-	۰/۱٤	-	-
$MgCl_2.6H_2O$	-	۰/۱	-	-
KH_2PO_4	-	۳	-	-
NH_4Cl	-	۰/۱	-	-
S	-	۱۰	۵	۵

به منظور تعیین عیار کانه معدنی و مقدار مس موجود در آن، پس از هضم آن در حلال تیزاب، از تست طیف‌سنجی جذب اتمی ((Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) برای تعیین مقدار مس استفاده شده است که ۰/۲٤ درصد مس در این کانسنگ وجود داشت. جهت تعیین و اندازه‌گیری میزان عناصر موجود در نمونه معدنی از دستگاه فلورسانس پرتو ایکس ((X-ray Fluorescence (XRF) مدل ARL Optimax استفاده شد. به منظور شناسایی ترکیب‌ها و فازهای موجود از دستگاه پراش پرتو ایکس (X-ray Diffraction (XRD)) مدل Philips-X'pert با لامپی از جنس مس و تابش K_α با طول موج ۱/٥٤۷۸۱ آنگستروم در بازه زاویه¬ای ۱۰ تا ۷۰ درجه و با سرعت ۰/۲ درجه بر ثانیه استفاده شد. برای اندازه‌گیری غلظت مس در محلول از روش AAS استفاده شد.

آزمایش‌های انحلال میکروبی

پس از اطمینان از سازگار شدن باکتری‌ها، فرآیند انحلال میکروبی بر روی ماده معدنی سولفیدی انجام گرفت. برای این منظور باکتری‌ها پس از قرار گرفتن در شرایط مناسب رشد طی ۳ روز، مورد استفاده قرار گرفت. تمام آزمایش‌های انحلال میکروبی در ارلن مایر ۵۰۰ میلی‌لیتری و درون انکوباتور انجام شد. روش کار بدین‌صورت بود که بعد از تلقیح باکتری به میزان ۱۰ درصد حجمی درون محیط کشت اختصاصی هر باکتری، ارلن حاوی محیط کشت و باکتری تلقیح شده درون انکوباتور با دمای ۳۰ °C و دور همزن ۱۸۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. بعد از گذشت ۱٦ الی ۲٤ ساعت، اندازه‌گیری روزانه pH و پتانسیل محلول با دستگاه Hanna مدل HI2211 شروع شد. باکتری‌ها با گذشت زمان شروع به رشد و تکثیر نموده و pH محلول کاهش یافته و پتانسیل افزایش می‌یابد. رشد و تکثیر باکتری با روش‌های اندازه‌گیری pH و پتانسیل محلول تحت نظر قرار گرفت. جهت کنترل رشد توسط اندازه¬گیری pH و پتانسیل محلول نیز، نمونه‌ها از دستگاه انکوباتور خارج گردیده و pH محلول و پتانسیل اندازه¬گیری گردید. حفظ روند کلی کاهش pH و افزایش پتانسیل محلول نشان‌دهنده و ملاک رشد و تکثیر باکتری‌ها و تولید اسید قرار گرفته شد. با توجه به روند تغییرات این دو پارامتر، اغلب بعد از گذشت ٤ الی ۵ روز، میزان pH محیط به نزدیک ۱ رسیده و شرایط جهت اضافه نمودن پودر ماده معدنی فراهم می‌شود. بعد از اضافه نمودن ماده معدنی به محیط کشت، روند اندازه‌گیری pH و پتانسیل محلول ادامه داده شد و جهت بررسی میزان انحلال مس طی روزهای مختلف، یک نمونه ۱۰ میلی‌لیتری از محلول جدا شده و بعد از فیلتر نمودن، محلول شفاف حاصل جهت بررسی میزان انحلال فلز هدف تحت آنالیز AAS قرار گرفت.

طراحی آزمایش

در این پژوهش، از نرم افزار Design-Expert version 7.1 software (DX7) توسعه یافته توسط Stat-Ease برای طراحی آزمایش، تحلیل نتایج و رسم و تحلیل گرافیکی نتایج به دست آمده استفاده شده است. پارامترهای pH، نسبت جامد به مایع، میزان گوگرد، میزان آهن، میزان تلقیح باکتری و درصد باکتری T.t به عنوان پارامترهای متغیر فرآیند در نظر گرفته شدند و پارامترهای سرعت هم‌زدن ۱۸۰ دور بر دقیقه، زمان ۱۵ روز و دمای ۳۰ °C به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند.

pH محلول توسط اسید سولفوریک رقیق به مقدار مشخص رسانده می‌شود. گوگرد و آهن هم به شکل پودر عنصری به محلول اضافه می‌شود. از بین انواع روش‌های فاکتوریل دو سطحی، از فاکتوریل جزئی دو سطحی با کمترین آزمایش‌ها در تفکیک‌پذیری پنج به همراه شش نقطه مرکزی (Center point) استفاده شد و با کاهش تعداد آزمایش از تاثیر برخی اندرکنش‌های ناکارآمد بر فرآیند چشم‌پوشی گردید. پارامترهای آزمایش و سطوح آن‌ها در جدول (۳) ملاحظه می‌گردد. انتخاب سطوح جدول (۳) بر اساس آزمون های تجربی اولیه قبلی در آزمایشگاه بوده است.

جدول ۳ پارامترهای آزمایش و سطوح آنها

فاکتور	نام	کران پایین	سطح صفر	کران بالا
a	درصد حجمی تلقیح باکتری	۱۰	۱۵	۲۰
b	نسبت جامد به مایع (گرم بر میلی‌لیتر)	۵	۱۵	۲۵
c	میزان گوگرد(گرم بر لیتر)	۵	۱۲/۵	۲۰
d	pH	۰/۷۵	۱/۶۳	۲/۵
e	میزان آهن(گرم بر لیتر)	۲۰	٤۵	۷۰
f	درصد باکتری T.t	۲۰	۵۰	۸۰

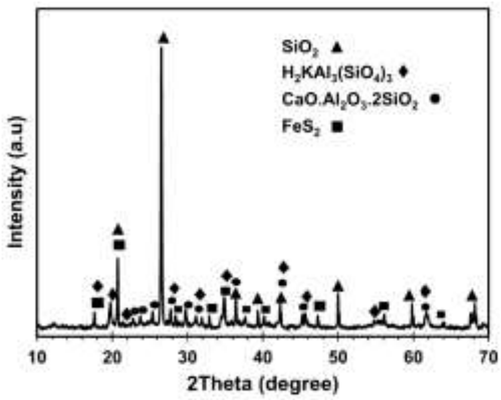
هدف از انجام این مرحله، به دست آوردن پارامترهای موثر از بین تمامی فاکتورهای محاسبه شده، به منظور به دست آوردن معادله ریاضی حاکم بر فرآیند انحلال میکروبی است. با توجه به آزمایش‌های غربال‌گری، نسبت جامد به مایع، درصد باکتری T.t و میزان آهن در محیط کشت به عنوان پارامترهای تغییرپذیر موثر انتخاب شدند. همچنین سرعت هم‌زدن ۱۸۰ دور بر دقیقه، زمان ۱۵ روز، دمای ۳۰ °C، میزان گوگرد ۵ گرم بر لیتر و میزان تلقیح باکتری ۱۰ درصد به عنوان پارامترهای ثابت انتخاب شدند. انحلال مس به عنوان پاسخ روش انتخاب و جهت بررسی این میزان، با توجه به تغییر پارامترها و بررسی اثر متقابل این متغیرها از روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology-Central Composite Designe (RSM-CCD)) و از آرایه چرخان (Rotatable) استفاده گردید. مقادیر بهینه متغیرها با حل معادله به دست آمده از فرآیند حاصل شد. هریک از پارامترها در ۵ سطح کدبندی گردید. انتخاب سطوح متغیرها، با توجه به نتایج به دست آمده از نتایج آزمایش‌های غربال‌گری صورت پذیرفت. با وجود اینکه تمام بازه انتخابی هر یک از سه پارامتر بر راندمان اثر دارند، اما فقط بخشی از بازه پیشنهادی غربال‌گری انتخاب شده است که راندمان بالا وجود دارد. متغیرها و سطوح آن‌ها در جدول (٤) آورده شده است.

جدول ٤ متغیرها و سطوح آنها

فاکتور	-α	کران پایین	0	کران بالا	+α
b	۳/۳	۵	۷/۵	۱۰	۱۱/۷
f	٦٦/۵۹	۷۰	۷۵	۸۰	۸۳/۱٤
e	١٦/۵۹	۲۰	۲۵	۳۰	۳۳/۱٤

نتایج و بحث

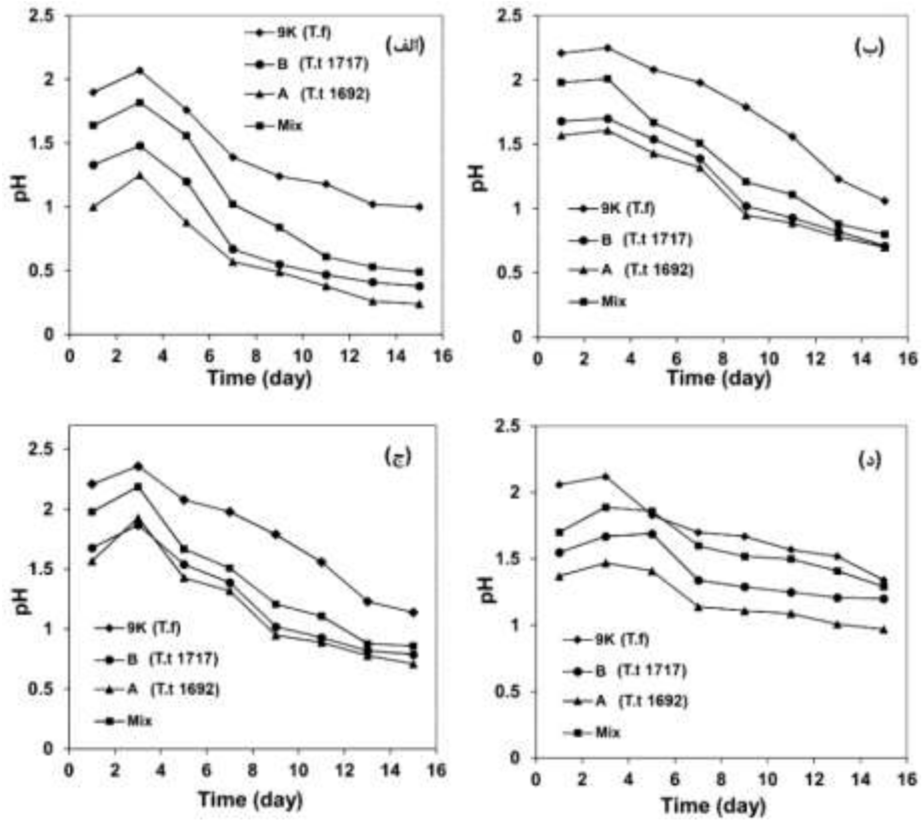
شکل (۱) الگوی XRD نمونه کانه معدنی را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج آنالیز XRF، ترکیب نمونه کانه معدنی شامل پیریت (٦/۵۳ درصد وزنی)، کالکوسیت (۰/۱۵ درصد وزنی)، کوولایت (۰/۰۷۸ درصد وزنی) و کالکوپیریت (۰/۰۹۱ درصد وزنی) است. علاوه بر این اصلی‌ترین ترکیبات گانگ همراه کانه معدنی شامل کوارتز (SiO_2)، آنورتیت ($CaO.Al_2O_3.2SiO_2$) و موسکوویت ($H_2KAl_3(SiO_4)_3$) می‌شود. علت عدم مشاهده پیک‌های مربوط به ترکیبات کالکوسیت، کوولایت و کالکوپیریت در الگوی XRD به درصد کم آنها در کانه مربوط می‌شود که کمتر از حد تشخیص روش XRD است. آنالیز کانی‌شناسی نشان داده است که درصد بالای مس در کانسنگ موجود به صورت کالکوسیت (۰/۱۵ درصد وزنی)، کوولایت (۰/۰۷۸ درصد وزنی) و کالکوپیریت حضور دارد و سپس مس به صورت کوولایت و میزان کمتری کالکوپیریت در کانسنگ مشاهده شده است. حضور مس به شکل سولفیدهای ثانویه و کم بودن میزان کالکوپیریت شرایط را برای استفاده از روش انحلال میکروبی فراهم ساخته است. ضمنا اندازه ذرات کانه آسیاشده کمتر از ۱۰ میکرون است.



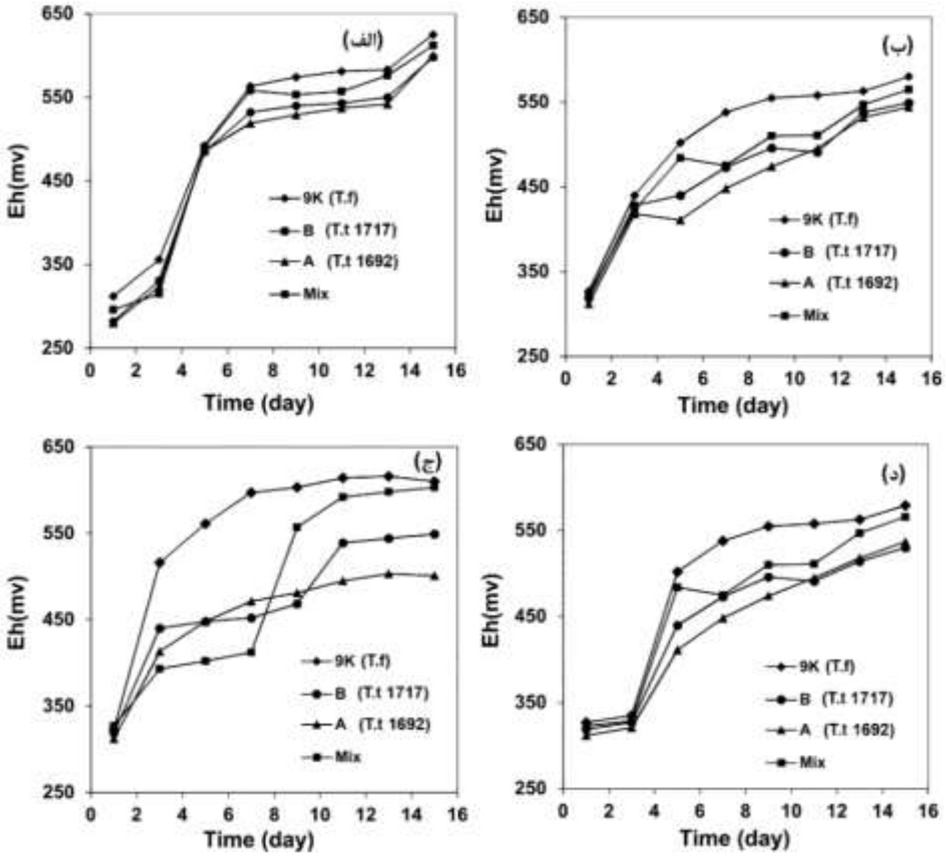
شکل ۱ الگوی XRD نمونه کانه سولفوری کم عیار معدن میدوک مجتمع مس شهر بابک

انحلال میکروبی

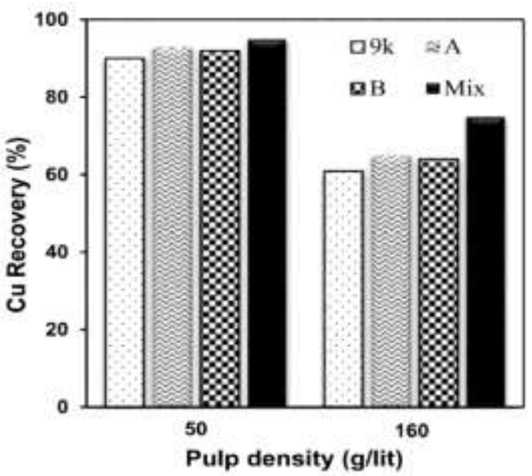
نتایج حا صل از تغییرات pH و Eh در شکل‌های (۲) و (۳) ملاحظه می‌شود. در شکل (۲) دیده می‌شود که میزان کاهش pH در باکتری‌های نوع T.t بیشتر بوده است. بعد از گذشت حدود ٦ تا ۱۰ روز میزان کاهش pH کمتر شـــده و تغییرات pH کمتر بوده اســـت. کاهش pH برای باکتری های نوع T.f نســـبت به باکتری های نوع T.t کمتر بوده و محدوده pH در حـضور این نوع باکتری نیز بالاتر ا ست. افزایش ماده معدنی با افزایش مصرف اسید باعث افزایش pH می شود. همچنین افزایش میزان ماده معدنی با توجه به افزایش میزان عناصـــر مضر برای ر شد باکتری موجب افزایش pH محیط می گردد. در شکل (۲) در ابتدای حضور ماده معدنی در محیط کشت حاوی باکتری، افزایش pH محیط مشاهده می شود که ناشی از شـوک وارده به میکروارگانیســم در اثر حضــور در محیط کشت حاوی ماده معدنی با طبیعت قلیایی است.



شکل ۲ تغییرات pH محیط‌های کشت مختلف بعد از سازگارسازی در دمای ۳۰ °C و دور همزن ۱۸۰ دور بر دقیقه در حضور مقادیر مختلف نمونه معدنی سولفیدی (الف) ۲۰، (ب) ٤۰، (ج) ۸۰ و (د) ۱٦۰ گرم بر لیتر



شکل ۳ تغییرات Eh محیط‌های کشت مختلف در دمای °C ۳۰ و دور همزن ۱۸۰ دور بر دقیقه در حضور مقادیر مختلف نمونه معدنی سولفیدی (الف) ۲۰، (ب) ۴۰، (ج) ۸۰ و (د) ۱۶۰ گرم بر لیتر



شکل ٤ میزان انحلال مس در نسبت‌های جامد به مایع و محیط¬های مختلف پس از ۱۵ روز انحلال میکروبی در دمای °C ۳۰ و دور همزن ۱۸۰ دور بر دقیقه

با گذشت زمان، باکتری خود را با محیط تطبیق داده و شروع به رشد و تکثیر می‌کند و همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، باعث شروع روند کاهشی pH شده است. اما میزان کاهش pH با زمان در محیط‌های حاوی مقادیر بیشتر

ماده معدنی کمتر است. به خصوص در حضور ١٦٠ گرم از ماده معدنی این روند بسیار کند است. البته این امکان وجود دارد که با تغییر برخی مشخصات محیط کشت و یا حتی استفاده از محیط کشت‌های دیگر، توانایی باکتری‌ها را نیز در تحمل مقادیر بیشتر ماده اضافه شده به محیط ارتقا داد. به همین دلیل در قسمت بعد به انتخاب محیط کشت بهینه برای انحلال مس از ماده معدنی با کمک این میکروارگانیسم‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به شکل (٣)، افزایش مقدار پتانسیل محلول نشان‌دهنده قدرت اکسیدکنندگی باکتری و تبدیل گوگرد عنصری به اسید سولفوریک است [7]. برآیند رفتار صعودی باکتری در پتانسیل محلول، روند نزولی pH و در نهایت میزان انحلال مس در طی زمان، نشان‌دهنده مناسب بودن باکتری و رشد و تکثیر آن جهت دسترسی به میزان قابل قبول از انحلال مس است. در ادامه آزمایش‌های انحلال میکروبی، محیط کشت مناسب باکتری که موجب بیشترین میزان انحلال مس می‌شود انتخاب گردید. شکل (٤) میزان انحلال مس را در مدت ۱۵ روز و در محیط‌های کشت مختلف و غلظت‌های ۵۰ و ١٦٠ گرم بر لیتر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، بیشترین میزان انحلال فلز مس در این غلظت‌ها در محیط کشت Mix اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد حضور همزمان باکتری¬های T.t و T.f می‌تواند به انحلال موثرتر فلز منجر گردد. باکتری T.f در مقایسه با T.t از قدرت اکسیداسیون قوی‌تری برخوردار بوده، درحالی که باکتری T.t در تولید اسید قوی‌تر عمل می‌کند. همزمانی این دو مکانیزم در محیط کشت Mix باعث شده تا در مقایسه با سایر محیط‌ها، بازدهی بالاتری حاصل گردد. اختلاف میان انواع محیط کشت به طور مشخص‌تر در هنگام حضور مقدار ماده معدنی بیشتر، به سادگی قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار جامد به ١٦٠ گرم بر لیتر، میزان انحلال مس کاهش محسوسی داشته که نشان¬دهنده این واقعیت است که باکتری نتوانسته در مدت زمان فرآیند سازگارسازی، شرایط رشد و تکثیر خود را با حضور مقادیر بیشتر ماده معدنی هماهنگ نماید و به همین خاطر، انحلال بالایی از فلز هدف حاصل نشده است. بنابراین حضور همزمان هر دو باکتری باعث گردیده تا واکنش‌های ذکر شده در مقایسه با حالتی که هر یک از دو نوع باکتری به تنهایی فعالیت می‌کنند بازدهی بالاتری داشته باشند.

آزمایش‌های غربال‌گری به روش دو فاکتوریل

آزمایش‌های طراحی شده، در جدول (۵) آورده شده است. در جدول (٦)، مجموع مربعات از تفاوت بین مقدار میانگین برای هر پارامتر و مقدار میانگین کل به دست می‌آید. درجه آزادی عبارت است از یکی کمتر از تعداد سطوح هر پارامتر. میانگین مربعات از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی محاسبه می‌گردد. آزمایش فیشر برای هر پارامتر، از تقسیم میانگین مربع پارامتر بر میانگین مربع باقی مانده به دست می‌آید.

درصد مشارکت با توجه به مقدار آزمایش فیشر و سطح اطمینان (در اینجا ۹۵ درصد) محاسبه می‌گردد و مقدار درصد مشارکت کوچک‌تر از سطح اطمینان، نشان‌دهنده قابل قبول بودن تاثیر پارامتر مربوط است [17]. از جدول (٦) ملاحظه می‌شود که مقدار آزمایش فیشر ۱۲۷/۷۴ برای مدل دلالت بر قابل قبول بودن مدل دارد و تنها ۰/۰۱ درصد امکان آن وجود دارد که مدل بر اساس پارامتر موثر دیگری تغییر یابد. مقدار درصد مشارکت کمتر از ۰/۰۵ برای پارامترها با سطح اطمینان ۹۵ درصد دلالت بر قابل قبول بودن آنها دارد. از میان پارامترهای مورد بررسی، پارامترهای درصد باکتری T.t، نسبت جامد به مایع و میزان آهن پارامترهای موثر هستند. در واقع پارامتر pH، پارامتری موثر است و pHهای بیان شده مربوط به شروع آزمایش‌ها بوده‌اند. اما همان طور که قبلا بیان شد، حین انحلال میکروبی کانه سولفیدی مس، pH با گذشت زمان تغییر می‌کند. لذا در نظر گرفته نشدن این پارامتر در واقع به دلیل عدم تاثیرگذاری آن نیست. بلکه به دلیل متغیر بودن آن حین فرآیند و بنابراین غیرقابل کنترل بودن این پارامتر است.

جدول ٥ آزمایش‌های غربالگری و مقدار انحلال مس تحت سرعت هم‌زدن ۱۸۰ دور بر دقیقه، زمان ۱٥ روز و دمای ۳۰ °C

استاندارد	اجرا	f	e	d	c	b	a	درصد انحلال مس
۱	۲۱	۲۰	۲۰	۰/۷٥	٥	٥	۱۰	۸۷
۲	٦	۸۰	۷۰	۰/۷٥	۲۰	٥	۱۰	۹٥
۳	۲	۸۰	۲۰	۲/٥	٥	٥	۱۰	۸۹
٤	۱۳	۲۰	۷۰	۲/٥	۲۰	٥	۱۰	۸۲/٦۹
٥	۱٦	۸۰	۷۰	۰/۷٥	٥	۲٥	۱۰	٦۹/۲۳
٦	۲۲	۲۰	۲۰	۰/۷٥	۲۰	۲٥	۱۰	٦٥
۷	۱	۲۰	۷۰	۲/٥	٥	۲٥	۱۰	٦۷
۸	۲۰	۸۰	۲۰	۲/٥	۲۰	۲٥	۱۰	۷۱/٥٦
۹	٤	۲۰	۷۰	۰/۷٥	٥	٥	۲۰	۸٥
۱۰	۳	۸۰	۲۰	۰/۷٥	۲۰	٥	۲۰	۹٤/٦۷
۱۱	۱٤	۸۰	۷۰	۲/٥	٥	٥	۲۰	۹۸/٦٥
۱۲	۱٥	۲۰	۲۰	۲/٥	۲۰	٥	۲۰	۹۲
۱۳	٥	۸۰	۲۰	۰/۷٥	٥	۲٥	۲۰	۷۳/٤٥
۱٤	۱۱	۲۰	۷۰	۰/۷٥	۲۰	۲٥	۲۰	٦۳
۱٥	۱۲	۲۰	۲۰	۲/٥	٥	۲٥	۲۰	٦۲/۹۳
۱٦	۱۰	۸۰	۷۰	۲/٥	۲۰	۲٥	۲۰	۷٥
۱۷	۱۷	٥۰	٤٥	۱/٦۳	۱۲/٥	۱٥	۱٥	۸۱/۷۸
۱۸	۹	٥۰	٤٥	۱/٦۳	۱۲/٥	۱٥	۱٥	۷۹
۱۹	۱۹	٥۰	٤٥	۱/٦۳	۱۲/٥	۱٥	۱٥	۸۳
۲۰	۱۸	٥۰	٤٥	۱/٦۳	۱۲/٥	۱٥	۱٥	۸۲
۲۱	۸	٥۰	٤٥	۱/٦۳	۱۲/٥	۱٥	۱٥	۸۳
۲۲	۷	٥۰	٤٥	۱/٦۳	۱۲/٥	۱٥	۱٥	۸۱/٦

جدول ٦ نتایج آنالیز واریانس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آزمون فیشر	درصد مشارکت	توضیحات
مدل	۲۲۳۰/۷۳	۳	۷٤۳/٥۸	۱۲۷/۷٤	< ۰/۰۰۰۱	قابل قبول
b	۱۹٥٤/٥۲	۱	۱۹٥٤/٥۲	۳۳٥/۷٦	< ۰/۰۰۰۱	–
f	۲۳۹/۷۹	۱	۲۳۹/۷۹	٤۱/۱۹	< ۰/۰۰۰۱	–
e	۳٦/٤۲	۱	۳٦/٤۲	٦/۲٦	۰/۰۲۲۹	–
انحناء	۲۲/۷۱	۱	۲۲/۷۱	۳/۹۰	۰/۰٦٤۷	غیرقابل قبول
باقی‌مانده	۹۸/۹٦	۱۷	٥/۸۲	–	–	–
عدم تطابق	۸۸/۱۹	۱۲	۷/۳٥	۳/٤۱	۰/۰۹۲٤	غیرقابل قبول
خطا	۱۰/۷۷	٥	۲/۱٥	–	–	–
مجموع	۲۳٥۲/٤۰	۲۱	–	–	–	–
انحراف معیار استاندارد	۲/۸۲			R^2	۰/۹٤۱۹	
PRESS	۲۳۷/۰٤			دقت کافی	۲۲/۱۹۰	

آزمایش‌های بهینه‌سازی

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش غربال‌گری، به منظور بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ استفاده شد. روش‌های سطح پاسخ با توجه به دقت بالا و همچنین کاهش تعداد آزمایش‌ها و نیز زمان لازم برای انجام محاسبات، روش مناسب‌تری برای بهینه‌سازی نسبت به روش دو فاکتوریل هستند. در جدول ۷ آزمایش‌های طراحی شده و میزان مس انحلال یافته در هر آزمایش نشان داده شده است. جدول ۸ نشان‌دهنده آنالیز واریانس برای مدل تعیین‌شده با استفاده از پارامترهای انتخابی است. از جدول ۸ ملاحظه می‌شود که مقدار آزمایش فیشر ۲۵/۲۵ برای مدل دلالت بر قابل قبول بودن مدل دارد و تنها ۰/۱ درصد امکان آن وجود دارد که مدل بر اساس پارامتر موثر دیگری تغییر یابد. مقدار درصد مشارکت کمتر از ۰/۰۵ برای پارامترها با سطح اطمینان ۹۵ درصد دلالت بر قابل قبول بودن آنها دارد. بنابراین، پارامترهای نسبت جامد به مایع، میزان باکتری T.t و میزان آهن پارامترهای موثر هستند. با توجه به مقدار آزمایش فیشر و درصد مشارکت، ملاحظه می‌شود که پارامترهای انتخابی به درستی در مدل برازش شده‌اند. مقدار آزمایش فیشر برای نقصان برازش ۰/٦۱ است که بیانگر آن است که این مدل به خوبی بر روی پارامترهای برازش شده است.

در نهایت، مدل به د ست آمده برای فرآیند به صورت زیر است.

$$\text{درصد انحلال مس} = 97.36 - 0.47 \times \frac{\text{جامد}}{\text{مایع}} + 1.07 \times$$
$$\text{T.t درصد باکتری} - 0.68 \times \text{میزان آهن} + 0.51 \times \frac{\text{جامد}}{\text{مایع}} \times$$
$$\text{T.t درصد باکتری} - 1.17 \times \text{T.t درصد باکتری} \times$$
$$\text{میزان آهن} - 1.06 \times \left(\frac{\text{جامد}}{\text{مایع}}\right)^2 - 0.88 \times$$
$$\left(\text{میزان آهن}\right)^2$$

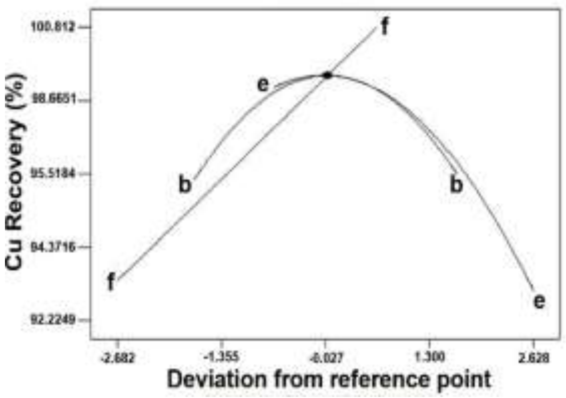
(٤)

جدول ۷ آزمایش‌های بهینه‌سازی و درصد انحلال مس تحت سرعت هم‌زدن ۱۸۰ دور بر دقیقه، زمان ۱۵ روز و دمای ۳۰ °C

استاندارد	اجرا	b	f	e	درصد انحلال مس
۱	۲	۵	۷۰	۲۰	۹۵/۳۸
۲	۱۷	۱۰	۷۰	۲۰	۹۳/۳
۳	۱۹	۵	۸۰	۲۰	۹۹/۱۰
٤	۱۳	۱۰	۸۰	۲۰	۹۸/۵۸
۵	۱٦	۵	۷۰	۳۰	۹۵/٤۱
٦	۷	۱۰	۷۰	۳۰	۹۳/۵۲
۷	۸	۵	۸۰	۳۰	۹٤/۰۰
۸	۲۰	۱۰	۸۰	۳۰	۹٤/٦۱
۹	۱۸	۳/۳۰	۷۵	۲۵	۹۵/۰٤
۱۰	۱۲	۱۱/۷۰	۷۵	۲۵	۹۳/۵٤
۱۱	۱۵	۷/۵۰	٦٦/۵۹	۲۵	۹٦/۰۲
۱۲	۱	۷/۵۰	۸۳/٤۱	۲۵	۹۹/۵۵
۱۳	۱۱	۷/۵۰	۷۵	۱٦/۵۹	۹٤/۹٤
۱٤	٦	۷/۵۰	۷۵	۳۳/٤۱	۹٤/٦۳
۱۵	۳	۷/۵۰	۷۵	۲۵	۹۷/۲۰
۱٦	۱	۷/۵۰	۷۵	۲۵	۹٦/۸۰
۱۷	۹	۷/۵۰	۷۵	۲۵	۹۸/۱۱
۱۸	۵	۷/۵۰	۷۵	۲۵	۹۸/۰۲
۱۹	۱٤	۷/۵۰	۷۵	۲۵	۹۷/۳۲
۲۰	۱۰	۷/۵۰	۷۵	۲۵	۹٦/۹٦

برای تفسیر موضوع، نمودار اختلالی (perturbation) مربوط به مدل ارائه شده در شکل (۵) آمده است و تاثیر عوامل مختلف نسبت جامد به مایع (b)، میزان آهن (e) و درصد باکتری T.t (f) در مقدار ثابت پارامترهای دیگر را نشان می‌دهد. محور افقی در این نمودار انحراف از نقطه مرجع در حالت کد شده است. این شکل بیانگر آن است که در بین پارامترهای مورد بحث، پارامتر نسبت جامد به مایع و میزان آهن تاثیر منفی و درصد باکتری T.t تاثیر مثبت بر درصد انحلال مس دارد. هر چه شیب مربوط به یک پارامتر بیشتر

باشد آن پارامتر موثرتر است. به عبارتی هر چه میزان جامد در محیط افزایش یابد بازده استحصال مس کاهش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند کاهش نسبت واکنش دهنده (اسید) به ماده معدنی در اثر افزایش میزان جامد باشد. به عبارتی مصرف اسید با افزایش میزان جامد بیشتر می‌شود. علت احتمالی دیگر به تاثیر عناصر مضر برای باکتری‌ها مربوط می‌شود که با افزایش میزان جامد مقدار عناصر مضر افزایش یافته و از فعالیت باکتری‌ها جلوگیری می‌کند. نسبت جامد به مایع بیشترین تاثیر منفی را در بین پارامترها داشته است. در حالی‌که افزایش درصد باکتری T.t تاثیر مثبت روی واکنش دارد که نشان می‌دهد میزان اسید تولید شده در محیط تاثیر زیادی در انحلال فلز مس دارد.



شکل ۵ نمودار اختلالی

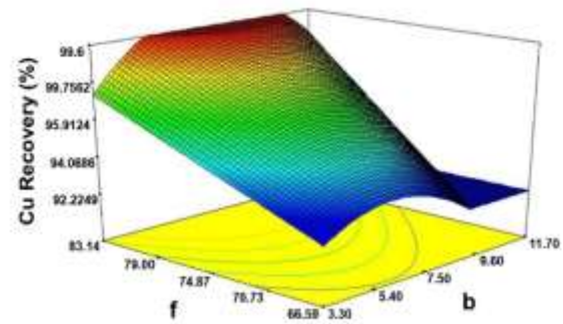
برهم‌کنش بین پارامترها

برای درک بهتر نتایج، تفسیر گرافیکی برهمکنش پارامترها در شکل های (٦) و (٧) نشان داده شده‌اند. شکل (٦) حالت سه‌بعدی برهم‌کنش دو پارامتر نسبت جامد به مایع و درصد باکتری T.t را نشان می‌دهد. در واقع این برهمکنش‌ها نشان می‌دهند که اثر ایجاد شده توسط یک پارامتر به سطح سایر پارامترها وابسته است. همان‌طور که دیده می‌شود در درصد بالای باکتری T.t، تاثیر منفی افزایش میزان جامد کمتر است. در حالی که در درصد پایین تر این باکتری، افزایش میزان جامد موجب کاهش بیشتر درصد انحلال مس می گردد. دلیل اثر منفی کمتر افزایش نسبت جامد به مایع در درصد باکتری بالاتر، حضور مقدار باکتری بیشتر و درنتیجه تولید اسید بیشتر است. در واقع در این شرایط، محیط توانایی بیشتری برای انحلال عنصر مس خواهد داشت. بالعکس، در درصد پایین تر باکتری T.t، اثر منفی غلظت جامد بالطبع بیشتر شده و بازدارندگی از تولید اسید نیز افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش درصد باکتری T.t، اسید بیشتری تولید شده و منجر به انحلال بیشتر مس خواهد شد. در واقع به کمک این نمودار می توان را حت تر میزان انحلال مس در شرایط مختلف را بررسی کرد.

برای تفسیر موضوع، نمودار اختلالی (perturbation) مربوط به مدل ارائه شده در شکل (۵) آمده است و تاثیر عوامل مختلف نسبت جامد به مایع (b)، میزان آهن (e) و درصد باکتری T.t (f) در مقدار ثابت پارامترهای دیگر را نشان می دهد. محور افقی در این نمودار انحراف از نقطه مرجع در حالت کد شده است. این شکل بیانگر آن است که در بین پارامترهای مورد بحث، پارامتر نسبت جامد به مایع و میزان آهن تاثیر منفی و درصد باکتری T.t تاثیر مثبت بر درصد انحلال مس دارد. هر چه شیب مربوط به یک پارامتر بیشتر باشد آن پارامتر موثرتر است. به عبارتی هر چه میزان جامد در محیط افزایش یابد بازده استحصال مس کاهش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند کاهش نسبت واکنش دهنده (اسید) به ماده معدنی در اثر افزایش میزان جامد باشد. به عبارتی مصرف اسید با افزایش میزان جامد بیشتر می شود. علت احتمالی دیگر به تاثیر عناصر مضر برای باکتری‌ها مربوط می شود که با افزایش میزان جامد مقدار عناصر مضر افزایش یافته و از فعالیت باکتری‌ها جلوگیری می‌کند. نسبت جامد به مایع بیشترین تاثیر منفی را در بین پارامترها داشته است. در حالی‌که افزایش درصد باکتری T.t تاثیر مثبت روی واکنش دارد که نشان می‌دهد میزان اسید تولید شده در محیط تاثیر زیادی در انحلال فلز مس دارد.

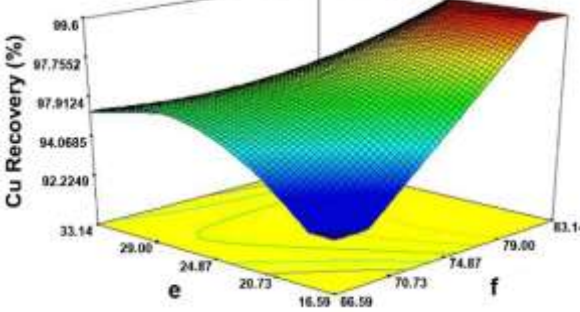
جدول ۸ نتایج آنالیز واریانس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آزمون فیشر	درصد مشارکت	توضیحات
مدل	۶۳/۲۶	۷	۹/۰۴	۲۵/۲۵	< ۰/۰۰۰۱	قابل قبول
b	۳/۰۰	۱	۳/۰۰	۸/۳۹	۰/۰۱۳۴	–
f	۱۵/۶۴	۱	۱۵/۶۴	۴۳/۷۰	< ۰/۰۰۰۱	–
e	۶/۳۹	۱	۶/۳۹	۱۷/۸۵	۰/۰۰۱۲	–
bf	۲/۰۶	۱	۲/۰۶	۵/۷۶	۰/۰۳۳۶	–
fe	۱۰/۸۶	۱	۱۰/۸۶	۳۰/۳۳	۰/۰۰۰۱	–
b^2	۱۶/۲۴	۱	۱۶/۲۴	۴۵/۳۷	< ۰/۰۰۰۱	–
e^2	۱۱/۳۱	۱	۱۱/۳۱	۳۱/۵۸	۰/۰۰۰۱	–
باقی‌مانده	۴/۳۰	۱۲	۰/۳۶	–	–	–
عدم تطابق	۴/۳۰	۷	۰/۶۱	–	۰/۳۶۵۷	–
خطا	۱/۴۳	۵	۰/۸۶	–	–	–
مجموع	۶۷/۵۵	۱۹	–	–	–	–
انحراف معیار استاندارد	۰/۶			R^2	۰/۹۳۶۴	
PRESS	۲۰/۹۶			دقت کافی	۱۶/۵۵۷	



شکل ۶ نمودار سه بعدی میزان انحلال مس در نسبت‌های جامد به مایع (b) و درصد باکتری T.t (f) مختلف

برهم‌کنش پارامترهای در صد باکتری T.t و میزان آهن در نسبت جامد به مایع برابر با ۷/۵ در شکل (۷) نشان داده شده ا ست. برهم‌کنش بین میزان آهن و در صد باکتری T.t نشان‌دهنده آن است که درصد باکتری به ازای سطوح زیاد و کم میزان آهن به ترتیب تاثیر خیلی کم و خیلی زیادی بر روی درصـــد انحلال مس دارد. به بیان دیگر در میزان آهن زیاد با افزایش باکتری T.t تغییر چندانی در ا ستح صال مس ایجاد نمی‌شـــود. در حالی که در مقادیر کم میزان آهن، با افزایش این باکتری انحلال مس به شـــدت افزایش می‌یابد. علت می‌تواند ناشـی از این باشـد که در اثر حضـور بیشـتر آهن، باکتری T.f بیشتر در محیط فعال می‌شود و باکتری T.t نقش کمتری در تولید اســید ایفا می کند و افزایش آن تاثیر زیادی در درصـــد انحلال مس نخواهد داشـــت. در کل، بیشـترین حالت اسـتحصـال مس در میزان آهن محیط کم و درصد باکتری T.t زیاد حاصل می‌گردد.



شکل ۷ نمودار سه بعدی میزان انحلال مس در میزان آهن (e) و درصد باکتری T.t (f) مختلف

بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند

همان‌طور که قبلا نیز اشاره گردید، هدف از انجام این آزمایش‌ها، بررسی شرایط مناسب جهت رسیدن به بیشترین میزان انحلال مس است. با توجه به تاثیر پارامترها و مدل ارائه شده، فرآیند با استفاده از نرم افزار DX7 مورد بهینه‌سازی قرار گرفته و ۱۱ جواب به عنوان بهترین جواب‌ها برای بهینه‌سازی مدل با شرایط گوناگون و مطلوبیت‌های مختلف ارائه شده است (Desirability). بهینه‌سازی به منظور بیشینه کردن انحلال مس بوده است. شرایط بهینه به صورت نسبت جامد به مایع ۷/۵۵ گرم بر میلی‌لیتر، ۸۰ درصد باکتری T.t، میزان آهن ۲۰ گرم بر لیتر و میزان استحصال مس ۹۹/۴۰ درصد توسط مدل پیش‌بینی شد. به منظور اطمینان از این موضوع، آزمایش عملی انحلال تحت شرایط بهینه پیشنهادی انجام شد و درصد انحلال به حدود ۹۸/۸ رسید. لذا نتایج بهینه‌سازی تا حد بسیار مطلوبی مورد تایید است.

نتیجه‌گیری

جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف موثر بر فرآیند انحلال میکروبی آزمایش‌های مختلف به کمک روش طراحی آزمایش و با به کارگیری نرم افزار DX7 طراحی شدند. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های اولیه سرعت هم‌زدن، زمان و دما به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. غربال‌گری پارامترها به کمک روش دوفاکتوریل صورت گرفت. از میان پارامترهای pH، نسبت جامد به مایع، میزان گوگرد، میزان آهن، میزان تلقیح باکتری و درصد باکتری‌های T.t و T.f، پارامترهای میزان آهن، نسبت جامده به مایع و درصد باکتری T.t به عنوان پارامترهای موثر شناسایی شدند. در ضمن با توجه به اینکه روش دو فاکتوریل روشی مناسب برای بهینه‌سازی نیست، پس از غربال‌گری و شناخت بهتر سطوح موثر پارامترهای ذکر شده، بهینه‌سازی این پارامترها به کمک روش سطح پاسخ بررسی شد. مدل به دست آمده توسط روش سطح پاسخ به صورت رابطه ریاضی ارائه شد. متغیر درصد باکتری T.t بالاترین ضریب را در مدل دارد که نشان می‌دهد در شرایط طراحی شده بیشترین تاثیر را بر انحلال مس دارد. با توجه به تاثیر پارامترها و مدل ارائه شده، فرآیند با استفاده از نرم افزار DX7 مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. در نهایت ۹۹/٤ درصد انحلال مس با شرایط نسبت جامد به مایع ۷/۵۵ g/mL گرم بر میلی‌لیتر، ۸۰ درصد باکتری T.t و میزان آهن ۲۰ گرم بر لیتر به دست آمد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در دانشگاه تهران و با حمایت شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شده است. نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از این شرکت به عمل می‌آورند.

مراجع

1. Ahmadi A., Schaffie M., Petersen J., Schippers A. and Ranjbar M., "Conventional and electrochemical bioleaching of chalcopyrite concentrates by moderately thermophilic bacteria at high pulp density", *Hydrometallurgy*, Vol. 106, pp. 84-92, (2011).
2. Muñoz J.A., Dreisinger D.B., Cooper W.C. and Young S.K., "Silver-catalyzed bioleaching of low-grade copper ores. Part I: shake flasks tests", *Hydrometallurgy*, Vol. 88, pp. 3-18, (2007).
3. Lee J., Acar S., Doerr D.L. and Brierley J.A., "Comparative bioleaching and mineralogy of composited sulfide ores containing enargite, covellite and chalcocite by mesophilic and thermophilic microorganisms", *Hydrometallurgy*, Vol. 105, pp. 213-221, (2011).
4. Muravyov M.I., Fomchenko N.V. and Kondrateva T.F., "Biohydrometallurgical technology of copper recovery from a complex copper concentrate", *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*, Vol. 47, pp. 663-

671, (2007).

۵. لطفعلیان م. ، رنجبر م.، فضائلی پور م.ح.، شفیعی م.، منافی ز.، "افزایش بازیابی مس در بیولیچینگ کنسانتره کالکوپیریتی با کنترل الکترو شیمیایی پتانسیل پالپ در حالت پیوسته" *نشریه علوم و مهندسی جداسازی*، دوره ۷، ۳۵–۴۳، (۱۳۹٤).

6. Demergasso C.S., Galleguillos P.A., Escudero G., Zepeda L.V., Castillo D. and Casamayor E.O., "Molecular characterization of microbial populations in a low-grade copper ore bioleaching test heap", *Hydrometallurgy*, Vol. 80, pp. 241-253, (2005).

7. Brandle H., "Microbial leaching of metals", *Biotechnology*, Vol. 10, pp. 191-224, (2001).

۸. وقار ر.، اولیازاده م.، وقار م.ر.، "فناوری میکروبی در متالورژی"، تهران: دانشگاه صنایع و معادن ایران، (۱۳۷۹).

9. Brombacher C., Bachon R., Brand H., "Biohydrometallurgical processing of solids: a patent review", *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 48, pp. 577-587, (1997).

10. Wang J., Zhu S., Zhang Y., Zhao H., Hu M., Yang C., Qin W. and Qiu G., "Bioleaching of low-grade copper sulfide ores by Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans", *Journal of Central South University*, Vol. 21, pp. 728-734, (2014).

11. Akcil A., Ciftci H. and Deveci H., "Role and contribution of pure and mixed cultures of mesophiles in bioleaching of a pyritic chalcopyrite concentrate", *Journal of Minerals Engineering*, Vol. 20, pp. 310-318, (2007).

12. Pradhan N., Nathsarma K.C., Rao K.S., Sukla L.B. and Mishra B.K., "Heap bioleaching of chalcopyrite: A review", *Minerals Engineering*, Vol. 21, pp. 355-365, (2008).

13. Manafi Z., Abdollahi H. and Tuovinen O.H., "Shake flask and column bioleaching of a pyritic porphyry copper sulphide ore", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 119, pp. 16-20, (2013).

14. Wang Y., Su L.J., Zeng W., Qiu G., Wan L., Chen X. and Zhou H., "Optimization of copper extraction for bioleaching of complex Cu-polymetallic concentrate by moderate thermophiles", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, pp. 1161-1170, (2014).

15. Pogliani C., Fetsis P. and Donati E., "Bioleaching of copper sulphide ore by pure and mixed cultures of mesophilic bacteria", *Hydrometallurgy*, Vol. 87, pp. 275-281, (2005).

16. Yang Y., Diao M., Liu K., Qian L. and Qiu G., "Column bioleaching of low-grade copper ore by Acidithiobacillus ferrooxidans in pure and mixed cultures with a heterotrophic acidophile Acidiphilium sp", *Hydrometallurgy*, Vol. 131/132, pp. 93-98, (2013).

17. Montgomery D.C., "Design and Analysis of Experiments", 8th Edition, John Wiley & Sons, Incorporated, (2013).